

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Metody měření průtoku na vzduchové trati

Methods of Flow Measurement on the Air Line

Student:

Petr Puczok

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Puczok**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**
Téma: **Metody měření průtoku na vzduchové trati**
Methods of Flow Measurement on the Air Line

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie měření průtoku vzduchu (metody a přístupy měření).
2. Charakteristika a princip měřících metod k měření průtoku vzduchu. Typy měřidel průtoku (popis, charakteristika).
3. Návrh experimentální měřící tratě k měření průtoku vzduchu pomocí různých měřidel (umístění měřidel).
4. Provedení měření průtoku na vzduchové trati pomocí různých měřidel.
5. Vyhodnocení výsledků měření průtoku na vzduchové trati (grafy, tabulky).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MIKAN, J. *Měření plynů*. Říčany u Prahy, 2003, 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
2. DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin - učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007, 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4. <http://vyuka.fs.vsb.cz/course/category.php?id=10>
3. *Měření třecích ztrát na vzduchové trati – návod* <http://www.338.vsb.cz/PDF/SKRIPTA01.pdf>.
4. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995, 155 s.
5. JENČÍK, J. KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha. SNTL Praha. 1982. 580 s.
6. NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha. SNTL Praha, 1987. 354 s.
7. NOSKIEVIČ, J. JANALÍK, J. RÝC, Z. ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin příručka pro laboratorní cvičení*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1987, 152 s. ISBN-80-03-00308-3.
8. VINOPAL, S. KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha. SNTL Praha, 1963. 650 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 19.5.2014

Setr Lucas
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci použít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014

Petr Puczk

podpis

Petr Puczk

Rodinná 233/5

73542, Těrlicko – Hradiště

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky, trpělivost a ochotu při vedení mé bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PUCZOK, P. *Metody měření průtoku na vzduchové trati: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 46s. Vedoucí práce: Bojko M.

Bakalářská práce se zabývá různými metodami měření průtoku na vzduchové trati. V úvodu je uvedena teorie měření průtoku plynů a jsou zde popsány základní metody měření průtoku. Z každé metody jsou vybrány hlavní typy měřidel. U vybraných měřidel je stručně popsán princip, na kterém fungují. Byly navrženy tři experimentální měřicí tratě, na kterých probíhalo samotné měření. K měření průtoku vzduchu byl využit digitální průtokoměr, kolenový průtokoměr a clona, která byla současně oceňována. Všechny tyto metody měření průtoku byly vyhodnoceny pomocí tabulek a grafických závislostí. V závěru jsou všechny metody porovnány v jedné grafické závislosti.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Průtok, Měření průtoku vzduchu, Digitální průtokoměr, Kolenový průtokoměr, Clona, Tlaková difference, Tlakový spád, Čejchovní křivka clony

ANNOTATION OF BACHELORS THESIS

PUCZOK, P. *Methods of Flow Measurement on the Air Line: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2014, 46p. Thesis head: Bojko, M.

This Bachelor Thesis deals with different kinds of methods of flow on air track. At the beginning there is theory of gas flow measuring and also description of basic methods of flow measuring. I have chosen main measurers from each method. In every single method there is slightly described the basic principle that it works on. There were three experimental measuring tracks that the actual measuring run on. For air flow measures was used digital flow meter, knee flow meter and clone, calibrated subsequently. All of these flow measure methods were evaluated using tables and graphs. In the end all methods are compared in one graph.

KEY WORD:

Flow, Measurement of air flow, Digital Flow Meter, Knee Flow Meter, Clone, Differential Pressure, Pressure Drop, Calibration curve Clone

Obsah

Seznam použitých označení	10
1. Úvod	12
2. Teorie měření průtoku plynu	14
2.1 Druh proudění skutečných tekutin	15
2.2 Bernoulliho rovnice pro ideální tekutiny	16
3. Základní metody měření	18
3.1 Měření objemového průtoku	18
3.1.1 Bubnový plynoměr	19
3.1.2 Membránový plynoměr	20
3.1.3 Rotační plynoměr	21
3.2 Měření rychlosti proudění tekutiny	21
3.2.1 Turbínový průtokoměr	22
3.2.2 Vírový průtokoměr	22
3.3 Měření hmotnostního průtoku	23
3.3.1 Coriolisův průtokoměr	23
3.3.2 Tepelný hmotnostní průtokoměr	24
3.4 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru	25
3.4.1 Clona	25
3.4.2 Kolenový průtokoměr	27
4. Návrh experimentální měřicí tratě	28
4.1 Metody měření průtoku na vzduchové trati	28
4.2 Charakteristika použitých prvků a měřidel	28
5. Měření průtoku na vzduchové trati pomocí digitálního průtokoměru	32
5.1 Popis měřícího zařízení	32
5.2 Postup měření	33
5.3 Vyhodnocení měření	34
6. Měření průtoku na vzduchové trati pomocí kolenového průtokoměru	38
6.1 Popis měřícího zařízení	38
6.2 Postup měření	39
6.3 Vyhodnocení měření	39

7.	Měření průtoku na vzduchové trati pomocí clony, cejchování clony	43
7.1	Popis měřicího zařízení	43
7.2	Postup měření	44
7.3	Vyhodnocení měření	44
7.4	Cejchování clony	50
8.	Závěr	51
9.	Seznam použité literatury	53

Seznam použitých označení

Označení	Význam	Jednotka
Q_m	hmotnostní průtok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_v	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
V	objem	$[\text{m}^3]$
T	teplota	$[\text{°K}]$
T_N	normální teplota	$[\text{°K}]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
V_N	objem při vztažném stavu	$[\text{m}^3]$
Re_D	Reynoldsovo číslo pro kruhové potrubí	$[1]$
D	průměr potrubí	$[\text{m}]$
v_s	střední rychlost proudění	$[\text{m/s}]$
η	dynamická viskozita tekutiny	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
ρ	hustota měřené tekutiny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ΔE_1	tlaková energie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
ΔE_2	potenciální energie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
v	rychlost proudění	$[\text{m/s}]$
n	počet otáček	$[\text{min}^{-1}]$

V_k	objem komor	$[m^3]$
V_c	cyklický objem	$[dm^3]$
S	průřez potrubí	$[m^2]$
K	konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtokoměru	$[1]$
Δp	diferenční tlak	$[Pa]$
α_k	průtokový součinitel kolena	$[1]$
D_k	vnitřní průměr kolena	$[m]$
r_s	střední poloměr zakřivení kolena	$[m]$
r_1	vnitřní poloměr kolena	$[m]$
r_2	vnější poloměr kolena	$[m]$
Q_{vN}	objemový průtok	$[l/min]$
p_1	statický tlak před digitálním průtokoměrem	$[Pa]$
ϑ	kinematická viskozita	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$
p_N	normální tlak	$[Pa]$
l	délka	$[m]$
h	výška	$[m]$
Δp_c	tlakový spád na clone	$[Pa]$

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá metodami měření průtoku na vzduchové trati. Pro měření průtoku a proteklého množství je v průmyslu využívána široká škála měřidel, které využívají různých fyzikálních principů. Použití průtokoměrů je podmíněné nejen podmínkami a účelem měření, ale také tím, že existují velké rozdíly v chemických i fyzikálních vlastnostech průmyslových tekutin. V dnešní době je nejčastěji měřicí veličinou v průmyslu právě proteklé množství a tlak.

Bakalářská práce se dělí na dvě části. V teoretické části je uveden popis měření proteklého množství plynu. Výběr měřidel je opřen o základní rozdělení metod měření průtoku. Mezi tyto metody patří objemové, rychlostní, hmotnostní a metody měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru. Z každé této metody jsou vybrány hlavní typy měřidel, pro měření průtoku plynu. Vybraná měřidla jsou stručně popsána a jsou popsány principy, na kterých fungují.

V praktické části bakalářské práce byla použita metoda sběru dat ve formě měření. Byly navrženy tři experimentální měřící tratě se třemi různými metodami měření průtoku vzduchu. Měření proběhlo v laboratoři mechaniky tekutin v místnosti E306, kde jsem využil například průtokoměr na principu žhavicího anemometru, kolenový průtokoměr a clonu.

První navržená trať využívala k měření průtoku vzduchu průtokoměr se žhavicím anemometrem (dále digitální průtokoměr). Při této metodě měření průtoku bylo nutné měřit před digitálním průtokoměrem statický tlak, jelikož digitální průtokoměr vyhodnocuje průtok při tzv. normálních podmínkách. Pro přepočet průtoku z normálních podmínek na podmínky pracovní je nutno znát skutečný statický tlak před průtokoměrem.

Kolenový průtokoměr byl použit při navrhování druhé experimentální měřící tratě. Jelikož kolenový průtokoměr funguje na principu tlakové difference, bylo nutné při měření průtoku na vzduchové trati měřit tlakovou diferenci na koleni. Kolenový průtokoměr má odběrná místa tlaku na vnitřní a vnější straně oblouku. K vyhodnocení této difference nám posloužil diferenční převodník tlaku a vyhodnocovací zařízení Almeno.

Třetí navržená experimentální měřicí trať se nepatrně odlišuje od předešlých dvou měřících tratí. U této metody měření průtoku vzduchu byla využita clona, která se řadí mezi průřezová měřidla průtoku. U tohoto měření jsem však nevyužil k měření průtoku samotnou clonu, ale digitální průtokoměr, který byl umístěn na konci měřicí trati. Na cloně byl měřen pouze tlakový spád clony, pomocí digitálního převodníku tlaku a vyhodnocovacího zařízení Almeno. Stejně jako u první metody měření pomocí digitálního průtokoměru, i zde musel být měřen statický tlak, pro přepočet průtoku z normálních podmínek na podmínky pracovní. Díky znalosti průtoku při jednotlivých otáčkách ventilátoru jsem vypočítal z rovnice kontinuity střední rychlost na cloně. Znalost střední rychlosti a tlakového spádu na cloně mi umožnila vyhodnotit cejchovní křivku clony ($v_s = f(\Delta p_c)$). Z této závislosti jsem vyjádřil rovnici cejchovní křivky, která v budoucnu poslouží k měření střední rychlosti nebo průtoku na vzduchové trati.

Ze seznamu literatury, která je uvedena v závěru samotné práce, jsem nejvíce využíval knihu Měření plynů [1] a Měření průtoku a výšky hladiny [3], kde jsou velmi podrobně a přehledně popsány charakteristiky a principy měřidel průtoku včetně obrázků.

2. Teorie měření průtoku plynu

Měření průtoku a proteklého množství plynu se realizuje pomocí mnoha měřících systémů pracujících na různých fyzikálních principech. Metody měření průtoku jsou založeny v podstatě na určování střední rychlosti proudění nebo na určení objemu popř. hmotnosti proteklé tekutiny v určitém časovém intervalu. Každý měřící systém se vyznačuje specifickými přednostmi i nedostatky, které pak mohou být rozhodující při volbě kritérií pro výběr měřidla. Zajímavé jsou například takové měřící systémy, které neobsahují pohyblivé části, mohou pracovat v libovolné poloze, mají lineární charakteristiku, velký měřicí rozsah (poměr $Q_{\min} : Q_{\max}$) apod [1].

Existence celé řady různých průtokoměrů je podmíněna tím, že existují velké rozdíly v chemických i fyzikálních vlastnostech průmyslových tekutin a rovněž se značně odlišují podmínky i účel měření.

Výsledek měření může být udáván jako průtok hmotnostní nebo objemový.

$$\text{Hmotnostní průtok:} \quad Q_m = \frac{dm}{dt} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.1.)$$

$$\text{Objemový průtok:} \quad Q_v = \frac{dV}{dt} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2.2.)$$

Četná měřidla bývají vybavena integračním zařízením a jejich údaj pak udává proteklé množství.

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad [kg] \quad (2.3.)$$

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_v dt \quad [m^3] \quad (2.4.)$$

Většina přístrojů udává změřený průtok respektive proteklé množství při provozních podmínkách (tlak, teplota). V případě proměnných stavových veličin se provozní podmínky přepočítávají na určité podmínky vztažené [2]. Vztažný stav je většinou stav tzv. normální stav definován parametry $T_N = 273,15 \text{ K}$, $P_N = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

Pro suché plyny, lze většinou při normálním provozním stavu plynu pro přepočítání na normální stav použít stavovou rovnici.

Pro objem při vztažném stavu poté dostaneme vztah:

$$V_N = V \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{p}{p_N} \quad (2.5.)$$

kde p [Pa], T [K] jsou provozní hodnoty tlaku a teploty.

Některé přístroje jsou vybaveny zařízením, které automaticky provádí tyto úpravy. Současný trend vývoje průtokoměrů je zaměřen na přímé měření hmotnostního průtoku, tj. měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny [2].

Význam měření průtoku je nesporný, průtokoměry poskytují informace o toku materiálu, jsou zdrojem podkladů pro bilance během technologického procesu, při příjmu i expedici, slouží jako čidla v regulačních obvodech a mají i velký význam pro bilanční měření znečišťujících látek v oblasti ochrany životního prostředí [2].

2.1 Druh proudění skutečných tekutin

Druh proudění má zásadní vliv na funkci průtokoměru. Povaha proudění je závislá na rozložení třecích a setrvačných sil v tekutině [1]. Rozeznáváme dva druhy proudění:

- laminární proudění
- turbulentní proudění

Při laminárním proudění (obr. 2.1) převládá účinek třecích sil mezi navzájem se nemíchajícími vrstvami proudící tekutiny. Částice tekutiny se pohybují po drahách, které se navzájem nekříží. Rychlost proudění po průřezu je rozložena parabolicky, kde nejvyšší rychlost je v ose potrubí a nejmenší rychlost na místě styku hraničních vrstev s vnitřními stěnami potrubí, kde jsou účinky třecích sil největší [1].

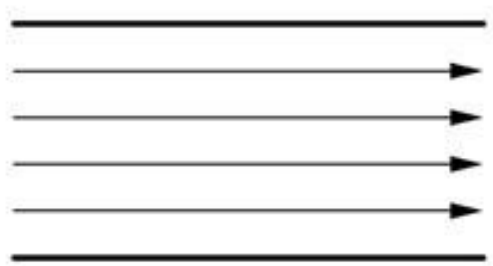
Při turbulentním proudění (obr. 2.2) dochází ke křížení drah částic tekutiny, vytváří se víry a chaotický pohyb tekutiny nepřispívající k průtoku. Ke zvýšení průtoku je nutno podstatně zvýšit tlak. Uplatňují se především účinky setrvačných sil, tekutina proudí ve většině průtočného průřezu téměř stejnou rychlostí a rychlostní profil je plochý [1].

Při určování druhu proudění je velmi důležité Reynoldsovo číslo Re , které udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pro kruhové potrubí o světlosti D je Reynoldsovo číslo [3].

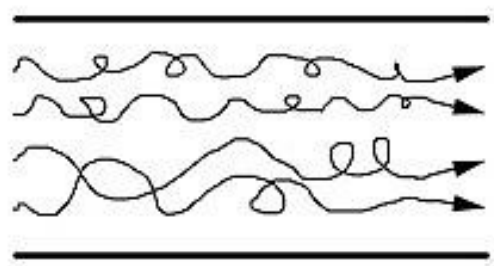
Re_D pro plyny je určeno vztahem:

$$Re_D = \frac{D \cdot v_s \cdot \rho}{\eta} \quad [1] \quad (2.6.)$$

kde	D – průměr potrubí	[m]
	v_s – střední rychlost proudění	[m/s]
	η – dynamická viskozita tekutiny	[Pa.s]
	ρ – hustota měřené tekutiny	[kg/m ³]



Obr. 2.1 - Laminární proudění [8]



Obr. 2.2 - Turbulentní proudění [8]

2.2 Bernoulliho rovnice pro ideální tekutiny

Bernoulliho rovnice popisuje energetické poměry při proudění tekutin a představuje aplikaci zákona o zachování energie na proudící tekutinu [3].

Tlaková energie:

$$\Delta E_{(1)} = p_1 \cdot S_1 \cdot \Delta l_1 - p_2 \cdot S_2 \cdot \Delta l_2 \quad (2.7.)$$

Potenciální energie:

$$\Delta E_{(2)} = m \cdot g \cdot h_1 - m \cdot g \cdot h_2 \quad (2.8.)$$

kde m – hmotnost tekutiny mezi místy potrubí o různých průřezech S_1 a S_2

g – tíhové zrychlení

Kinetická energie:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 \quad (2.9.)$$

Hmotnost m lze vyjádřit pomocí hustoty ρ , kde po úpravě rovnice dostaneme:

$$(p_1 - p_2) \cdot \frac{m}{\rho} - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.10.)$$

Když rovnici (1.10.) vynásobíme ρ/m pak dostaneme:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (2.11.)$$

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = konst. \quad (2.12.)$$

Rovnice (1.12.) je při uvažování tlaku p jako hustoty energie známa jako Bernoulliho rovnice. Část Bernoulliho rovnice pro $v = 0$ definuje statický tlak:

$$p_{stat} = p + \rho \cdot g \cdot h \quad (2.13.)$$

kde člen $\rho \cdot g \cdot h$, nazýváme hydrostatický tlak.

Dynamický tlak vychází ze vztahu:

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.14.)$$

Celkový tlak je tedy dán vztahem:

$$p_t = p_{stat} + p_{dyn} \quad (2.15.)$$

3. Základní metody měření

Každá metoda měření průtoku využívá jiných druhů průtokoměrů, které jsou založeny na konkrétních principech. Výčet následujících metod a snímačů měření průtoku není úplný, z nepřeberného množství byly vybrány nejčastěji používané. Přístroje, které používáme na měření průtoku, nazýváme průtokoměry. Metody měření průtoku dělíme do čtyř hlavních skupin:

- objemové metody:
 - u této metody odměřujeme množství plynu v odměrných prostorách
- rychlostní metody:
 - měří se rychlost protékajícího média
- hmotnostní metody
 - měří se veličina, která je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku
- měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru
 - průtokoměry založeny na principu zachování energie

3.1 Měření objemového průtoku

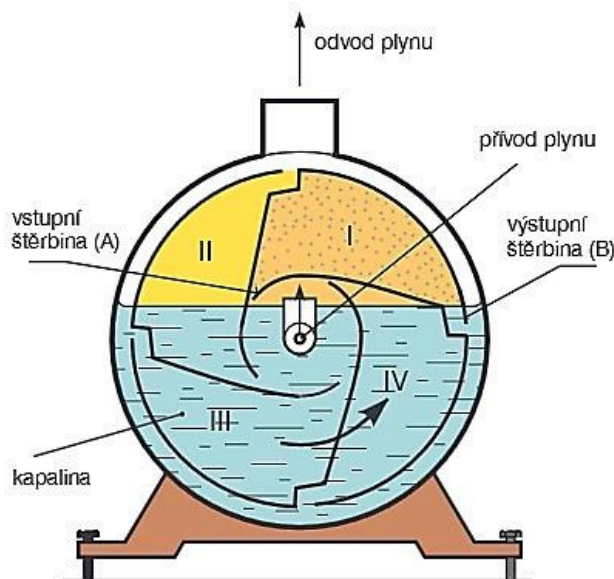
Průtokoměry určené pro měření objemového průtoku měří objem tekutiny přímo rozdělením objemu do samostatných odměrných prostor se známým objemem. Pokud vynásobíme známý objem odměrného prostoru počtem postupně naplněných prostor, získáme hodnotu objemu tekutiny, která protekla potrubím za určitou měřenou dobu [4].

Objemové průtokoměry mají obvykle počítadlo, které ukazuje celkový proteklý objem, avšak mohou mít na výstupu impulsy, odpovídající počtu naplněných prostor. V současnosti máme možnost vybírat z velkého množství těchto dávkovacích průtokoměrů. Přirozeně nejsou všechny stejné, mohou se lišit velikostí naplněných prostor, tvarem prostor, uložením lopatek atd.

Objemové průtokoměry nejsou vhodné pro měření průtoku znečištěných kapalin a kapalin obsahujících částice z důvodu velkého množství pohyblivých částí. Nejsou také vhodné pro měření průtoku plynů, jelikož je nelze spolehlivě utěsnit. Při měření na experimentální trati v laboratoři, jsem nevyužil žádný průtokoměr, který by spadal do této kategorie.

3.1.1 Bubnový plynoměr

Používá se pro přesná laboratorní a ověřovací měření. V ležaté válcové nádobě, vyplněné z části kapalinou (voda, olej), je otočně uložen vlastní měřicí buben (obr. 3.1). Buben je opatřen štěrbinami pro přívod a odvod plynu a rozdělen radiálními přepážkami na čtyři odměrné prostory. Přepážky jsou tvarovány tak, aby při otáčení bubnu kapalinou uzavírala současně např. vstupní štěrbinu 1 a výstupní 2, čímž je odměřen objem plynu v prostoru I. Plyn se přivádí trubicou, umístěnou v ose otáčení a její ústí leží nad hladinou uzavírací kapaliny. Prostor II se vyprazdňuje, III je zcela vyplněn kapalinou a IV se právě začíná plnit plynem. S hřídelem bubnu je spojeno počítadlo, udávající proteklé množství [2].



Obr. 3.1 - Bubnový plynoměr [5]

I, II, III, IV – Odměrné prostory: prostor I je zcela vyplněn plynem, prostor II se vyprazdňuje, prostor III je zcela vyplněn oddělovací kapalinou a prostor IV se začíná plnit plynem.

Mezi výhody bubnových plynoměrů řadíme např. velký měřicí rozsah (1:100), vysokou přesnost měření, malou tlakovou ztrátu (do 100 Pa) atd. Tyto plynoměry jsou vhodné pro průtok pohybující se v rozmezí 10 dm³/h až 300 m³/h.

K přepočtu proteklého množství využíváme objem komor a počet otáček:

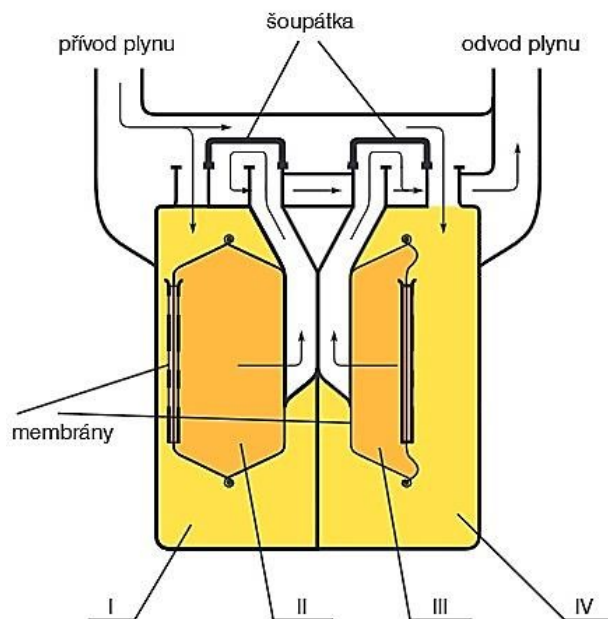
$$Q_v = \frac{n \cdot V_k}{1000} \quad [\text{m}^3] \quad (3.1.)$$

kde Q_v – objemový průtok $[\text{m}^3/\text{h}]$
 n – počet otáček $[1]$
 V_k – objem komor $[\text{m}^3]$

3.1.2 Membránový plynoměr

Membránový průtokoměr (obr. 3.2) se používá pro měření množství plynu. Ve společném pouzdře jsou čtyři odměrné prostory (I, II, III, IV) díky tomu, že dvě komory odděluje kožená membrána. Každý tento prostor je spojen hrdlem s rozvodným ústrojím tvořeným šoupátkem, jejichž pohyb je odvozen od pohybu membrán.

Tyto plynoměry můžeme např. využít k měření topných plynů. Dají se využít pro měření průtoku od desetin až stovek metrů krychlových za hodinu s nejistotou $\pm 1,5 - \pm 3 \%$. Na štítku plynoměru je udáván cyklický objem V_c , který se udává v dm^3 . Cyklický objem je jeden pracovní cyklus měřícího mechanismu tj. objem plynu, který projde plynoměrem za jednu otáčku.



Obr. 3.2 - Membránový plynoměr
(I, II, III, IV – odměrné prostory), [5]

Celkový objem je dán následujícím vztahem:

$$V = \frac{N \cdot V_c}{1000} \quad [\text{m}^3] \quad (3.2.)$$

kde N – počet otáček za časový úsek [1]

V_c – cyklický objem $[\text{dm}^3]$

Objemový průtok je dán vztahem:

$$Q_v = \frac{n \cdot V_c}{1000} \quad [\text{m}^3] \quad (3.3.)$$

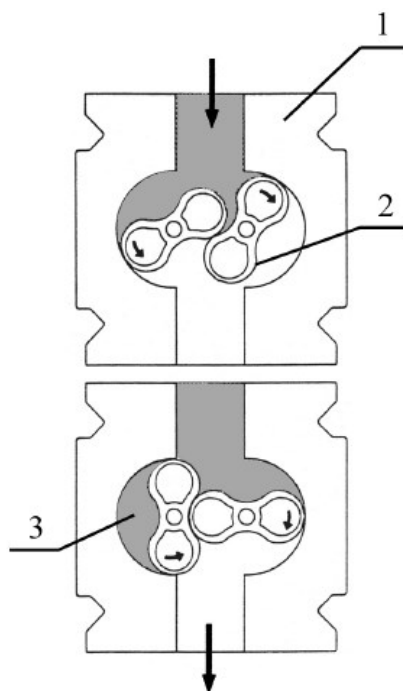
kde n – počet otáček za hodinu $[1/\text{h}]$

3.1.3 Rotační plynoměr

Rotační plynoměr je složen ze dvou proti sobě otáčejících pístů, které mají tvar osmičky a jsou vzájemně pootočený o 90° a z tělesa plynoměru, viz obr. 3.3. Otáčení pístů je umožněno díky synchronizace ozubených kol.

Za jednu celou otáčku pístu se odměří čtyři stejné objemy, které byly vytěsněny z obou měřících prostorů. Otáčky jednoho z pístů se přenáší pomocí magnetické spojky na počítadlo [1].

Proteklý objem plynu za čas je dán vztahem [1]:



Obr. 3.3 - Rotační plynoměr (1)

Legenda – 1- těleso plynoměru, 2 – otočné písty, 3 – měřící prostor

$$V = \frac{V_c \cdot N}{1000} \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.4.)$$

kde N – počet otáček za určitý časový úsek

3.2 Měření rychlosti proudění tekutiny

Rychlostní metody měření průtoku vychází z definice průtoku jako součinu střední rychlosti proudění a průtočného průřezu [1].

$$Q_v = v_s \cdot S \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (3.5.)$$

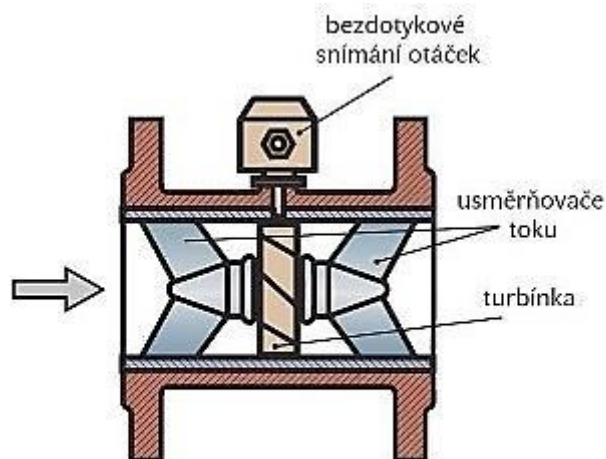
kde v_s – střední rychlost proudění [m/s]

S – průřez potrubí (průtočný průřez) [m²]

Průtokoměry měřící rychlostní metodou se stručně nazývají rychlostní průtokoměry (rychlostní plynoměry). Rychlostní měřidla pracují na principu měření rychlosti protékajícího plynu [1].

3.2.1 Turbínový průtokoměr

Jejich základem je volně otočný rotor s lopatkami, viz obr. 3.4. Rotor se vlivem proudění tekutiny (plynu) otáčí, kdy otáčky jsou úměrné rychlosti proudění kapaliny (plynu). Otáčky bývají snímány bezdotykovým indukčním snímačem, kdy výstupem jsou napěťové impulsy, které se dále zpracovávají a vyhodnocují [4].

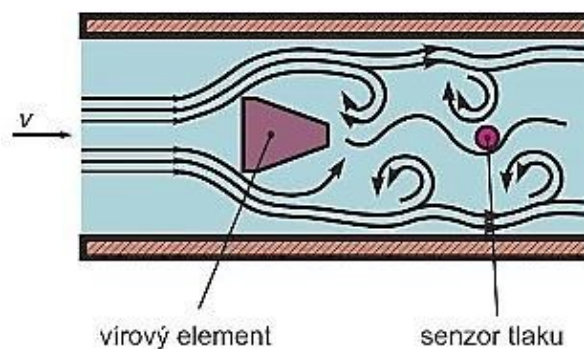


Obr. 3.4 - Turbínový průtokoměr [6]

Pro impulsní snímání otáček se využívají různé snímače jak mechanické, tak i bezdotykové (indukční, fotoelektrické, elektromagnetické, ultrazvukové atd.). Impulsy se dále zesilují a tvarují. Bezdotykové snímače jsou výhodné z hlediska číslicového zpracování signálu a odpadá zde nutnost těsnění. Lze je použít i k měření při velkých statických tlacích [6].

3.2.2 Vírový průtokoměr

Princip tvorby vírů v proudícím médiu je znám již dlouhou dobu, ale teprve v roce 1970 bylo tohoto jevu využito ke konstrukci průtokoměru. U vírového průtokoměru se využívá tvorby tzv. Karmánových vírů, které vznikají při obtékání tělesa neproudnicového tvaru, umístěného kolmo na směr proudění [6].



Obr. 3.5 - Vírový průtokoměr [6]

Vznik vírů na přepážce vede k změně tlaku nebo rychlosti. Tato změna je snímána vhodným senzorem (např. piezoelektrickým snímačem nebo kapacitním diferenčním snímačem) a posléze je převedena na elektrický signál, viz obr. 3.5.

Jednotlivé druhy vírových průtokoměrů se od sebe mohou lišit hlavně tvarem a velikostí vloženého tělesa. Dále místem, kde je těleso v potrubí umístěno a principem snímání.

Jako výhodou vírových průtokoměrů se dá uvést jejich necitlivost na změny teploty, tlaku nebo hustoty měřeného média. Nevýhodou je, že vírové průtokoměry nelze použít při malých rychlostech proudění.

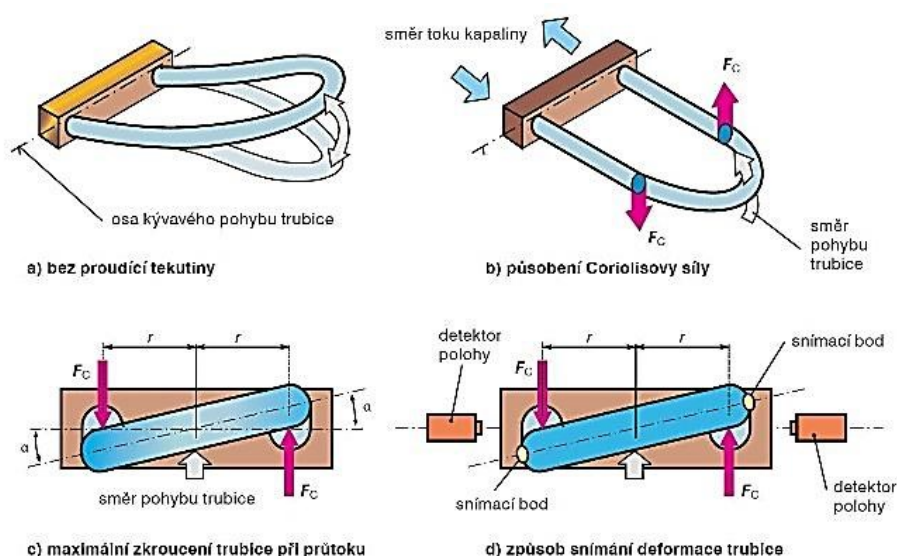
3.3 Měření hmotnostního průtoku

Vedle nepřímého zjištění hmotnostního průtoku přepočtem z objemového průtoku existuje relativně málo přímých metod měření hmotnostního průtoku [4]. Dvěma základními metodami jsou:

- Coriolisův průtokoměr
- Tepelný hmotnostní průtokoměr

3.3.1 Coriolisův průtokoměr

Princip měření spočívá ve vyhodnocování deformace měřicí trubice způsobené Coriolisovou silou. Coriolisova síla vzniká při průtoku tekutiny záměrně rozkmitanou měřicí trubicí. Deformace způsobena Coriolisovou silou, je velmi malá a je superponována na budící deformaci. Změna deformace měřicí trubice, způsobená hmotnostním průtokem, se pak projeví fázovým posuvem snímaných kmitů [1]. Uspořádání měřicích trubic je různé, avšak nejčastěji se používá trubice ve tvaru U (obr 3.6.).



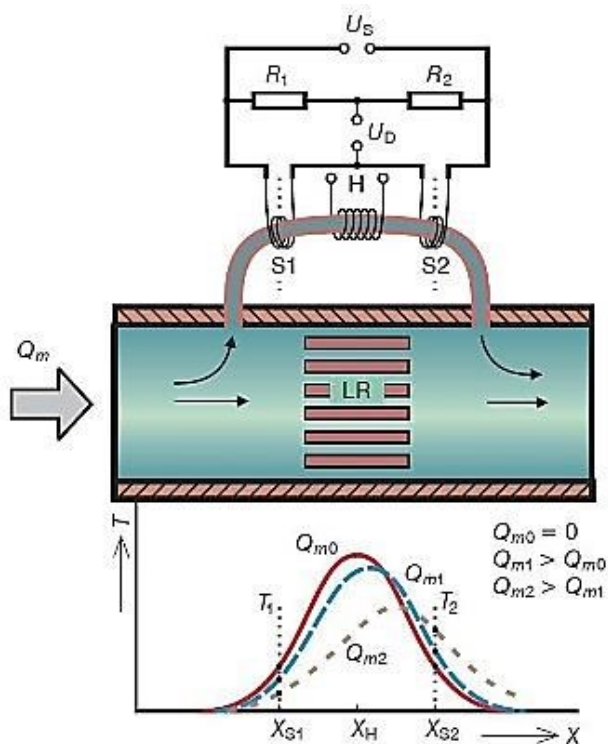
Obr. 3.6 - Coriolisův senzor typu U [7]

3.3.2 Tepelný hmotnostní průtokoměr

Tepelný hmotnostní průtokoměr vychází ze závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolím, které tvoří proudící tekutina, na hmotnostním průtoku. Existují dva typy těchto průtokoměrů, termoanemometry a kolorimetrické průtokoměry [5].

Termoanemometr je elektricky vyhřívaná sonda, která je vložena do potrubí, ve kterém proudí tekutina. Množství tepla odebíraného na sondě tekutinou je závislé na rychlosti proudění, hustotě, tepelné vodivosti a na teplotě proudícího média, kterou je potřeba měřit. Čidlem termoanemometrů bývá platinový drátek o průměru 0,01 až 0,1 mm, který je žhavený na teplotu 200 až 500 °C [5].

Kolorimetrický hmotnostní průtokoměr vyhodnocuje míru oteplení způsobenou prouděním hmoty. Kolorimetrický senzor bývá standardně vytvořen na tenké obtokové kapiláře. Tato tenkostěnná kapilára má určený průměr (přibližně 1 mm) a prochází skrze ni jen určitá část průtoku vzhledem k celkovému průtoku měřeného média procházejícího průtokoměrem.[7] Typické uspořádání senzoru je znázorněno na obr. 3.7.



Obr. 3.7 - Kolorimetrický průtokoměr [7]

3.4 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru

Principu rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru využívá většina průmyslových průtokoměrů. Základní skupinou těchto průtokoměrů jsou škrťací orgány. Mezi škrťací orgány můžeme zařadit např. clonu, dýzu, Venturiho trubici atd. Mezi průtokoměry snímající diferenci tlaku patří rychlostní sondy (Pitotova trubice, Prandtlůva trubice a jiné), kolenový průtokoměr, plovákové průtokoměry, atd.

Tlakové poměry v potrubí při proudění popisuje Bernoulliho rovnice. Ta vyjadřuje zákon zachování mechanické energie v tekutinách, podle kterého při stejných podmínkách tlak v tekutině klesá s nárůstem rychlosti jejího proudění. K tomuto jevu dojde, pokud do potrubí, ve kterém proudí tekutina, vložíme překážku. Rychlost proudění (kinetická energie) tekutiny při průchodu překážkou roste při poklesu statického tlaku v tekutině (potenciální energie). Rozdíl tlaků před a za překážkou je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění [4].

$$v_s = k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (3.6.)$$

kde v_s – střední rychlost proudění tekutiny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

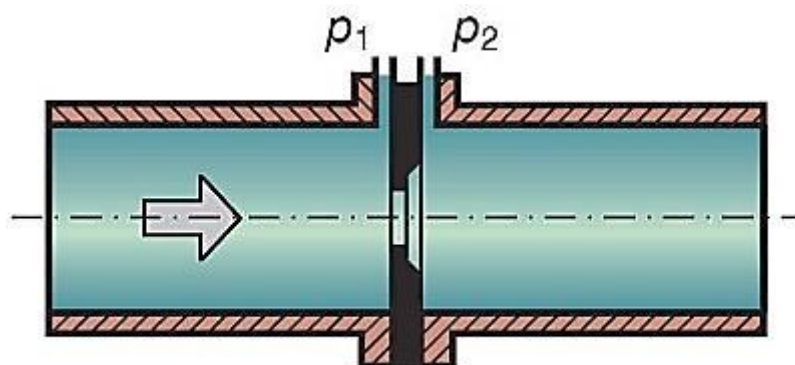
k – konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtokoměru [1]

Δp – diferenční tlak [Pa]

ρ – hustota tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

3.4.1 Clona

Clona je průřezové měřidlo, jehož fyzikální princip měření je založen na Bernoulliho jevu. Jev popsáný Bernoulliho rovnicí (kapitola 2.2) nastane, vložíme-li do potrubí s proudící tekutinou překážku, tzv. škrťací orgán [1]. Při průchodu překážkou (clonou) roste rychlost proudění tekutiny (kinetická energie) a dochází k poklesu statického tlaku v tekutině (potenciální energie). Měří se rozdíl tlaků, ze kterého lze vypočítat objemový nebo hmotnostní průtok pro konkrétní tvar a rozměry clony, viz obr. 3.8.

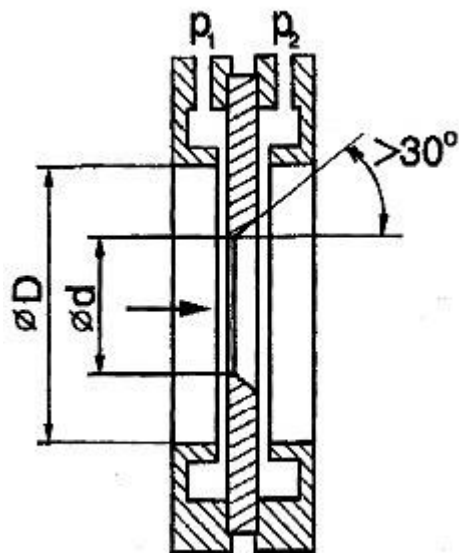


Obr. 3.8 – Clona [5]

p_1 – statický tlak před zúžením, p_2 – statický tlak v místě zúžení

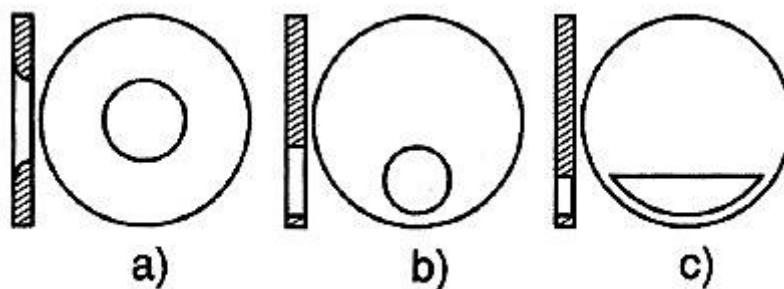
Mezi nejrozšířenější typ clony patří clona normalizovaná. Jedná se o desku s kruhovým otvorem, který je souosý s potrubím. Otvor musí mít ostrou pravoúhlou přední (vstupní) hranu [1].

Tlak p_1 a p_2 se odebírá těsně před a za clonou. U menších světlostí je odběr komorový (obr. 3.9) a u větších světlostí je odběr bodový (koutový).



Obr. 3.9 - Normalizovaná clona s komorovým odběrem tlaků [1]

V současnosti máme na výběr z celé řady provedení clon, např. čtvrtkruhová, excentrická, segmentová atd. Provedení výše jmenovaných typu clon je na obr. 3.10. Se čtvrtkruhovou clonou jsem prováděl měření v laboratoři.



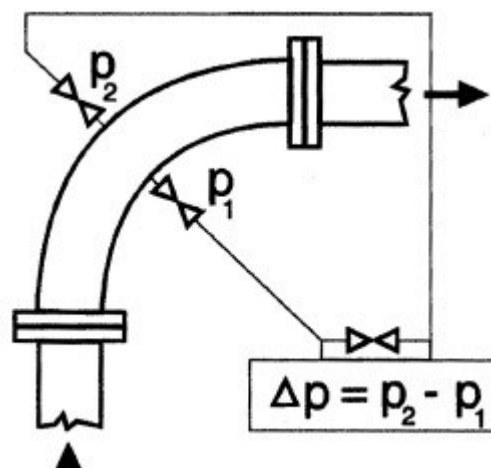
Obr. 3.10 - Clony různého provedení [1]

Legenda: a) čtvrtkruhová; b) excentrická; c) segmentová

3.4.2 Kolenový průtokoměr

Kolenový průtokoměr patří mezi průtokoměry využívající tlakové difference. Z hlediska konstrukce jsou velmi jednoduchým zařízením. Jak již napovídá název, je to koleno, které má hladký vnitřní povrch se dvěma měřicími místy tlaku. Statický tlak se mění na vnitřní a vnější straně.

Vlivem odstředivé síly vzniká na vnější straně ohybu větší tlak a platí, že $p_2 > p_1$ [1].



Obr. 3.11 - Princip měření kolenovým průtokoměrem [1]

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (3.7.)$$

Objemový průtok je definován vztahem:

$$Q_v = \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.8.)$$

kde α_k – průtokový součinitel kolena [1]

D_k – vnitřní průměr kolena [m]

ρ – hustota plynu [kg/m^3]

$$\alpha_k = 1,057 \sqrt{\frac{r_s}{D}} - 0,103 \quad (3.9.)$$

kde r_s – střední poloměr zakřivení kolena

$$r_s = \frac{r_2 + r_1}{2} \quad (3.10.)$$

kde r_1 – vnitřní poloměr kolena [m]

r_2 – vnější poloměr kolena [m]

Při měření pomocí kolenového průtokoměru je nutno použít citlivé senzory tlakové difference, neboť tlakový rozdíl Δp je malý. Tento typ průtokoměru jsem využil při měření v laboratoři.

4. Návrh experimentální měřicí tratě

Metody měření průtoku na vzduchové trati byly realizovány pomocí experimentálních měřících tratí, které byly sestaveny v laboratoři mechaniky tekutin v místnosti E306. Vytvořené tratě k měření průtoku se od sebe odlišovaly použitými měřidly a samotnou skladbou experimentální tratě. Zvolené metody a měřidla k měření průtoku na vzduchové trati jsou uvedeny v kapitole 4.1.

4.1 Metody měření průtoku na vzduchové trati

Hlavní náplní této práce je vyzkoušet různé metody měření průtoku na vzduchové trati. Celkově byly k měření průtoku vzduchu využity tři metody. V první metodě byl k měření průtoku použit digitální průtokoměr SD 9000 od firmy IFM Electronic, který funguje na principu žárového anemometru. Podrobnější popis tohoto principu je uveden v kapitole 3.3.2. Ve druhé metodě jsem využil jako měřidlo průtoku kolenový průtokoměr. Tento průtokoměr funguje na principu rozdílu tlaků na vnější a vnitřní straně kolenového měřidla. V kapitole 3.4.2 naleznete přesný popis tohoto měřidla. Jako třetí metodu měření průtoku jsem zvolil clonu včetně jejího cejchování. Clona se řadí mezi průřezová měřidla. V kapitole 3.4.1 je uveden princip tohoto měřidla.

4.2 Charakteristika použitých prvků a měřidel

V této kapitole jsou uvedené všechny použité prvky a měřidla, které jsem využil při sestavování měřících tratí. Technické informace jsem čerpal z katalogů jednotlivých výrobců a z podkladů návodu pro měření třecích ztrát na vzduchové trati [11].

Byly použity tyto prvky:

- Vysokotlaký ventilátor
- Frekvenční měnič
- Digitální průtokoměr

- Kolenový průtokoměr
- Potrubí
- Clona
- Vyhodnocovací zařízení
- Digitální převodník tlaku
- Kroužek pro odběr statického tlaku

Vysokotlaký ventilátor HRD T/FU – 105/ 0,75:

Průtok:	7,0 m ³ /min
Tlak:	4900 Pa
Napětí:	230/ 400 V
Frekvence:	105 Hz
Proud:	3,05/ 1,75 A
Výkon motoru:	0,75 kW
Maximální otáčky	6090 min ⁻¹
Hmotnost:	12,5 (15,5) kg
Výrobce:	Energoekonom spol. s.r.o.



Obr. 4.1 - Vysokotlaký ventilátor [9]

Frekvenční měnič Combivert F5 – B (Basic) :

Napájení:	3 x 400 V
Výkon:	0,75 kW
Jmenovitý proud:	2,6 A
Maximální proud:	5,6 A
Max. výstupní frekvence:	1600 Hz
Výrobce:	Karl E. Brinkmann GmbH



Obr. 4.2 - Frekvenční měnič [10]

Digitální průtokoměr SD 9000:

Měřicí rozsah:	1,3 – 410 Nm ³ /h
V krocích po:	0,5 Nm ³ /h
Přesnost:	± 3%
Teplotní rozsah:	0 – 60 °C
Hmotnost:	4,163 kg
Výrobce:	IFM Electronic



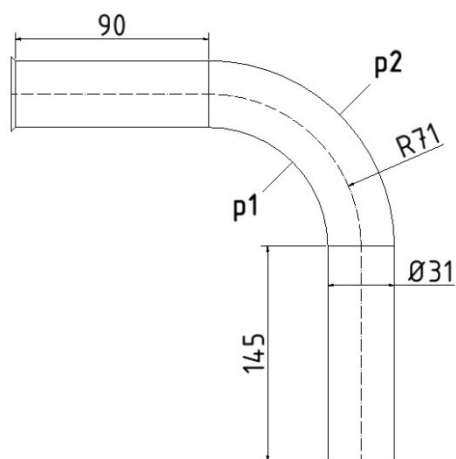
Obr. 4.3 - Digitální průtokoměr SD 9000 [11]

Kolenový průtokoměr:

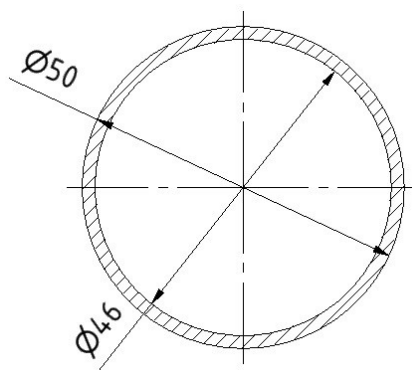
Výrobce: VŠB
Materiál: Plast
 $R_s = 71 \text{ mm}$
 $d = 31 \text{ mm}$

Potrubí:

Materiál: Plast
Světlost: 46 mm



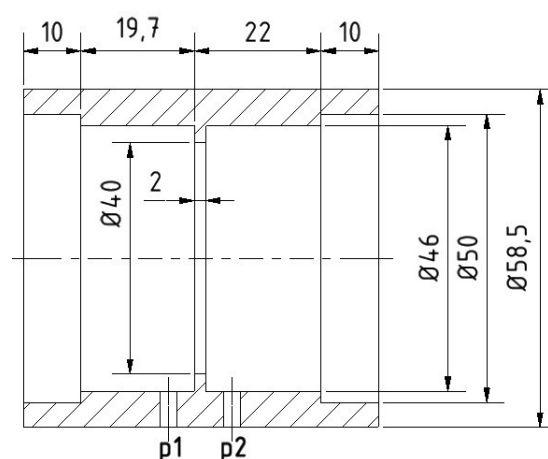
Obr. 4.4 - Kolenový průtokoměr



Obr. 4.5 – Plastové potrubí

Clona:

Výrobce: VŠB
Materiál: Silon



Obr. 4.6 - Clona

Vyhodnocovací zařízení:

Typ: ALMENO 2290-3
Napájení: 9 V
Vstup: 2 analogové vstupy
Výstup: 2 analogové výstupy
Výrobce: AHLBOR Mess-und
Regelungstechnik GmbH



Obr. 4.7 - Vyhodnocovací zařízení [10]

Digitální převodník tlaku:

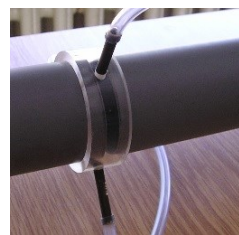
Typ: Almeno FD8612DPS
Měřicí rozsah: 0 – 2500 Pa
Výstup: Analogový (0 - 10
V)
Napájecí napětí: 6 V
Přesnost: ± 1 %
Přetížitelnost: pěti násobná



Obr. 4.8 - Digitální převodník tlaku [10]

Kroužek pro odběr statického tlaku:

Materiál: plast
Světlost: 50 mm



Obr. 4.9 - Odběrný kroužek statického tlaku [10]

5. Měření průtoku na vzduchové trati pomocí digitálního průtokoměru

5.1 Popis měřícího zařízení

Experimentální měřicí trať je sestavena z ventilátoru, který je poháněn elektromotorem. Elektromotor je ovládán frekvenčním měničem, pomocí kterého lze měnit otáčky a tím i průtok. Za výstupem z ventilátoru následuje přímý úsek potrubí o délce 2450 mm a vnitřním průměrem 46 mm. Na konci potrubí je umístěn digitální průtokoměr SD 9000. V délce 805 mm před digitálním průtokoměrem je umístěn odběrný silonový kroužek, který spojuje dva úseky potrubí. Tento odběrný kroužek má po obvodě symetricky umístěná tři odběrná místa z důvodu měření střední hodnoty statického tlaku v daném průřezu (ozn. p v obr. 5.1). K měření tohoto tlaku jsem použil diferenční snímač tlaku s analogovým výstupem. K vyhodnocení analogového výstupu ze snímače diferenčního tlaku posloužilo vyhodnocovací zařízení ALMENO 2290-3.



Obr. 5.1 – Schéma experimentální měřicí tratě s digitálním průtokoměrem

Reálná podoba měřicí tratě je zobrazena na obr. 5.2.



Obr. 5.2 - Měřicí trať s digitálním průtokoměrem

5.2 Postup měření

Experimentální měřicí trať byla sestavena v konfiguraci, jak je to zobrazeno na schématu (obr. 5.1, 5.2). Kroužek pro odběr statického tlaku (obr. 4.9) p_1 jsem osadil silikonovou hadičkou, která byla následně připojena do digitálního převodníku tlaku typ Almeno FD8612DPS (obr. 4.8). Tento digitální převodník tlaku byl připojen do vyhodnocovacího zařízení Almeno 2290-3 (obr. 4.7). Statický tlak je měřený z důvodu pozdějšího přepočtu objemového průtoku z normálních podmínek na podmínky pracovní, jelikož použitý digitální průtokoměr vyhodnocuje průtok při normálních podmínkách. Jakmile bylo vše sestaveno, mohlo začít samotné měření. Sepnutím hlavního jističe byl uveden do provozu ventilátor s elektromotorem (obr. 4.1), jehož otáčky jsem měnil pomocí frekvenčního měniče (obr. 4.2). V prvním měření jsem nastavil frekvenci na 5 Hz, což nám dávalo otáčky ventilátoru 300 min^{-1} . Následně jsem odečetl hodnotu statického tlaku (p_1) z vyhodnocovacího zařízení a hodnotu průtoku (Q_{VN}) z digitálního průtokoměru (obr. 4.3). Měření proběhlo pro frekvenční rozsah v následujících krocích: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100 Hz.

5.3 Vyhodnocení měření

Obecný postup výpočtu:

- a) Hodnoty objemového průtoku Q_{vN} [Nm³/h] jsem odečítal z digitálního průtokoměru a následně zapisoval do tabulky. Statický tlak p_1 , který byl měřen před digitálním průtokoměrem jsem rovněž zaznamenával do tabulky.
- b) Přepočet objemového průtoku Q_{vN} [Nm³/h] z normálních podmínek na podmínky pracovní:

$$Q_v = Q_{vN} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p} \text{ [m}^3\text{/h]}$$

kde Q_{vN} – objemový průtok [Nm³/h]
 T_N – tzv. normální teplota 273,15 [°K]
 T – teplota okolního vzduchu 294,72 [°K]
 P_N – normální tlak 101 325 [Pa]

$$p = p_N + p_1$$

kde p_1 – statický tlak naměřený před digitálním průtokoměrem

- c) Velikost střední rychlosti proudění vzduchu v potrubí v_s [m/s] dostaneme z rovnice kontinuity:

$$Q_v = v_s \cdot S \Rightarrow v_s = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2}$$

- d) Reynoldsovo číslo Re [1] vypočítáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu}$$

e) Otáčky elektromotoru $n [\text{min}^{-1}]$ určím ze vztahu:

$$n = 60 \cdot f$$

Poznámky:

$\vartheta [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ je kinematická viskozita vzduchu za podmínek $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $p = 0,1 \text{ MPa}$

$$\vartheta = 15,32 \cdot 10^{-6}$$

Ukázka výpočtu čtvrtého řádku z Tab. 5.1 pro měření průtoku digitálním průtokoměrem (trať obr. 5.1)

$$p = p_N + p_1 = 101325 + 91,1 \cong 101\,437 \text{ Pa}$$

$$Q_v = Q_{vN} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p} = 48 \cdot \frac{294,72}{273,15} \cdot \frac{101325}{101335,2} = 51,74 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_v = 51,74 \cdot \frac{1}{3600} = 0,0144 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_s = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,0144}{\pi \cdot 0,046^2} = 8,65 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\vartheta} = \frac{8,65 \cdot 0,046}{15,32 \cdot 10^{-6}} \cong 25\,969 [1]$$

$$n = 60 \cdot f = 60 \cdot 20 = 1200 \text{ min}^{-1}$$

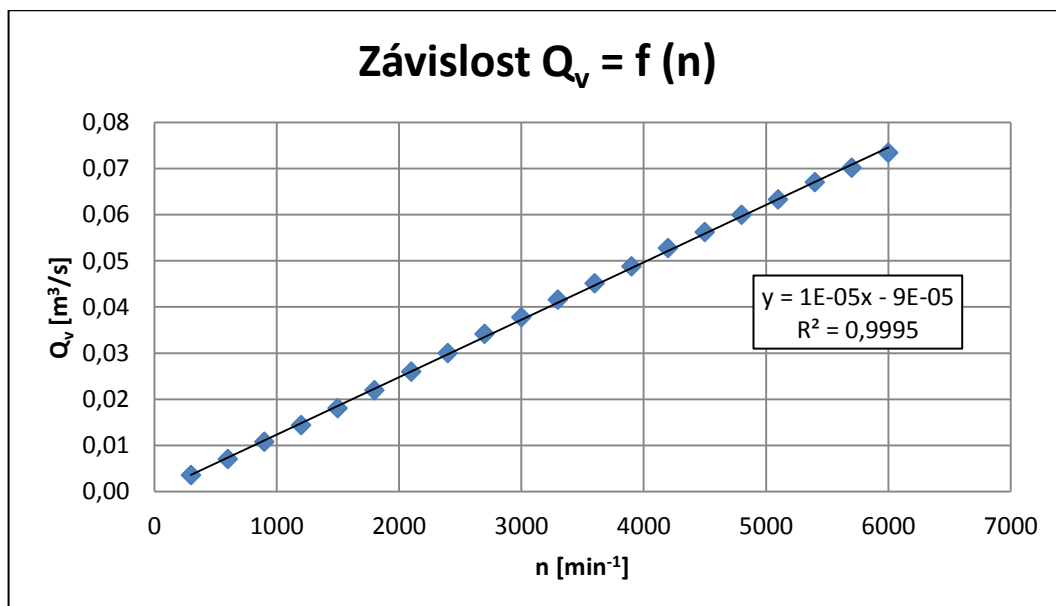
Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření pomocí digitálního průtokoměru jsou uvedené v tab. 5.1. Hodnoty Reynoldsova čísla Re [1] se pro všechna měření pohybují v hodnotách, které odpovídají turbulentnímu proudění.

Tab. 5. 1 – Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Č. měření	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty					
	Q_{vN}	f	p_1	p	Q_v	Q_v	v_s	Re	n
-	[Nm ³ /h]	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[m ³ /s]	[m/s]	[1]	[min ⁻¹]
1	12	5	25,3	101371	12,94	0,0036	2,16	6496	300
2	23,5	10	38	101384	25,35	0,007	4,24	12721	600
3	36	15	59,6	101406	38,82	0,0108	6,49	19483	900
4	48	20	91,1	101437	51,74	0,0144	8,65	25969	1200
5	60,5	25	130,9	101477	65,19	0,0181	10,9	32719	1500
6	73,5	30	180,5	101526	79,16	0,022	13,23	39730	1800
7	87	35	240	101586	93,65	0,026	15,65	46999	2100
8	100,5	40	307,3	101653	108,11	0,03	18,07	54256	2400
9	114,5	45	384,2	101730	123,08	0,0342	20,57	61768	2700
10	126,5	50	469,3	101815	135,86	0,0377	22,71	68184	3000
11	139,5	55	567,1	101913	149,68	0,0416	25,02	75119	3300
12	151,5	60	672,5	102018	162,39	0,0451	27,14	81497	3600
13	164	65	786,2	102132	175,59	0,0488	29,35	88122	3900
14	177,5	70	911,9	102258	189,81	0,0527	31,73	95259	4200
15	189,5	75	1046,9	102393	202,37	0,0562	33,83	101565	4500
16	202,5	80	1191,4	102537	215,95	0,06	36,1	108380	4800
17	214	85	1344,4	102690	227,88	0,0633	38,09	114364	5100
18	227	90	1506,3	102852	241,34	0,067	40,34	121120	5400
19	238	95	1683,6	103030	252,6	0,0702	42,22	126771	5700
20	249,5	100	1863	103209	264,34	0,0734	44,18	132665	6000

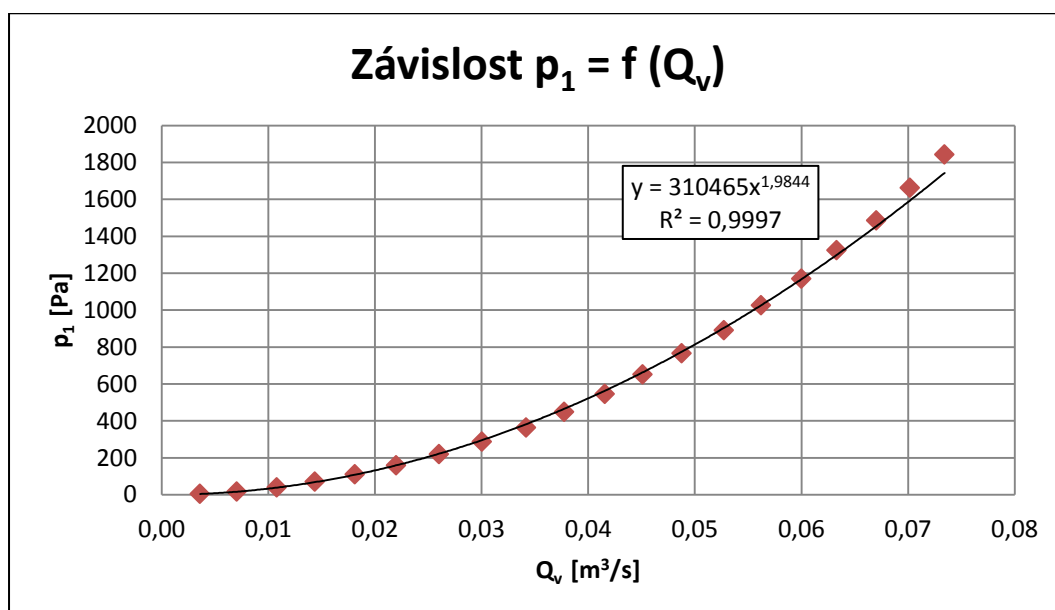
Grafy vyobrazující závislosti naměřených a vypočtených hodnot (tab. 5.1) jsou následující:

- Objemový průtok na otáčkách ventilátoru ($Q_v = f(n)$); viz obr. 5.3
- Statický tlak na objemovém průtoku ($p_1 = f(Q_v)$); viz obr. 5.4



Obr. 5.3 – Závislost průtoku na otáčkách ventilátoru

Obr. 5.3 zobrazuje závislost objemového průtoku na otáčkách ventilátoru. Se zvyšujícími se otáčkami roste i objemový průtok v rozmezí od 0,0036 m³/s do 0,0734 m³/s, jedná se o lineární závislost. Otáčky mají rozsah 300 min⁻¹ až 6000 min⁻¹.



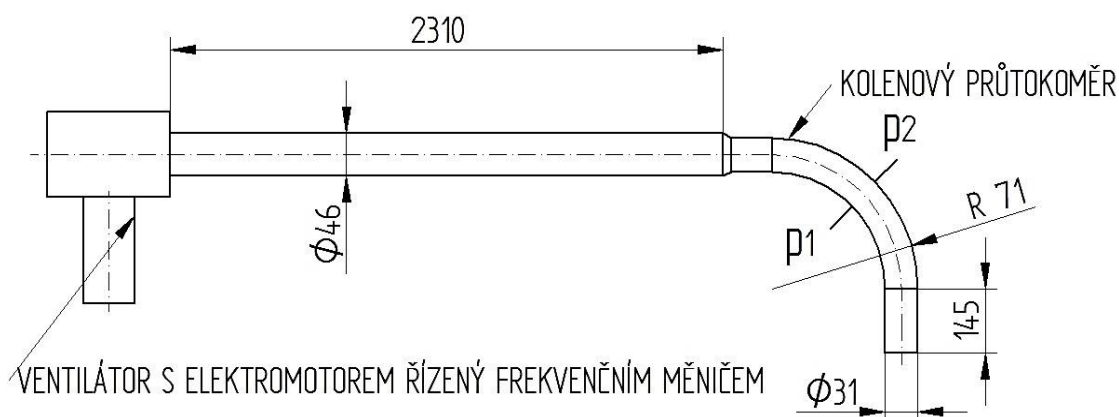
Obr. 5.4 – Závislost statického tlaku na objemovém průtoku

Obr. 5.4 zobrazuje závislost statického tlaku p_1 měřeného před průtokoměrem na objemovém průtoku Q_v . Se zvyšujícím se průtokem, statický tlak měřený před digitálním průtokoměrem roste (mocninná závislost). Statický tlak se pohybuje v hodnotách od 4,4 Pa do 1842,1 Pa. Průtok má rozsah 0,0036 m³/s až 0,0734 m³/s.

6. Měření průtoku na vzduchové trati pomocí kolenového průtokoměru

6.1 Popis měřícího zařízení

Druhou metodou měření průtoku, bylo měření průtoku pomocí kolenového průtokoměru (obr. 4.4). Stejně jako u předešlé kapitoly i zde byl využit ventilátor s elektromotorem (obr. 4.1), kde jsou otáčky ventilátoru měněny frekvenčním měničem (obr. 4.2). Za výstupem z ventilátoru následuje přímý úsek potrubí délky 2310 mm o světlosti 46 mm. Na konci potrubí je umístěn kolenový průtokoměr, jenž je vyroben ze svodového kolena o světlosti 31 mm a středním poloměru oblouku 71 mm. Na obr. 6.1 jsou vidět místa pro odběr tlaku, které jsou umístěné na vnitřní a vnější straně oblouku kolenového měřidla. Pro odběr tlaku byl použit digitální převodník tlaku ALMENO FD8612DPS (obr. 4.8) s analogovým výstupem, který byl připojen do vyhodnocovacího zařízení ALMENO 2290-3 (obr. 4.7).



Obr. 6.1 – Schéma experimentální měřící tratě s kolenovým průtokoměrem



Obr. 6.2 – Detailní pohled na kolenový průtokoměr



Obr. 6.3 – Reálná podoba experimentální měřící tratě

6.2 Postup měření

Experimentální měřicí trať byla sestavena, tak jak je znázorněno na obr. 6.1. Místa pro odběr tlaku v ohybu kolenového průtokoměru (na obr. 6.1 p_1 a p_2) jsem osadil silikonovými hadičkami, které byly následně připojeny do digitálního převodníku Almeno FD8612DPS (obr. 4.8). Digitální převodník byl připojen do vyhodnocovacího zařízení Almeno 2290-3. První měření proběhlo při frekvenci $f = 20$ Hz což odpovídalo otáčkám ventilátoru 1200 min^{-1} . Z vyhodnocovacího zařízení jsem odečetl hodnotu tlakové ztráty Δp . Tento postup byl dále proveden pro frekvenční rozsah v krocích 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100 Hz.

6.3 Vyhodnocení měření

Obecný postup výpočtu:

- Na vyhodnocovacím zařízení jsem odečetl velikost tlakové ztráty $\Delta p = p_2 - p_1$ na kolenovém průtokoměru (obr. 4.4). Tyto hodnoty jsem následně zapsal do tabulky.
- Z uvedené rovnice dostaneme velikost střední rychlosti proudění v koleni v_s [m/s]:

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

- Velikost objemového průtoku Q_V [m^3/s] dostaneme z rovnice:

$$Q_v = \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} \cdot v_s$$

$$\alpha_k = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{r_s}{D_k}} - 0,103$$

kde α_k [1] je průtokový součinitel kolene, v kapitole 3.4.2 je uveden přesný popis těchto rovnic.

d) Reynoldsovo číslo Re [1] získáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\vartheta}$$

e) Otáčky elektromotoru n [min^{-1}] určíme ze vztahu:

$$n = 60 \cdot f$$

Poznámky:

ρ [kg/m^3] je hustota vzduchu za podmínek $t = 20^\circ\text{C}$ a $p = 0,1$ MPa

$$\rho = 1,188 \text{ kg/m}^3$$

ϑ [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] je kinematická viskozita vzduchu za podmínek $t = 20^\circ\text{C}$ a $p = 0,1$ MPa

$$\vartheta = 15,32 \cdot 10^{-6}$$

Ukázka výpočtu čtvrtého řádku z Tab. 6.1 pro měření průtoku kolenovým průtokoměrem (trat' obr. 6.1)

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 46,1}{1,188}} = 8,81 \text{ m/s}$$

$$Q_v = \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot v_s = 1,4966 \cdot \frac{\pi \cdot 0,031^2}{4} \cdot 8,81 = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\alpha_k = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{r_s}{d_k}} - 0,103 = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{71}{31}} - 0,103 = 1,4966 [1]$$

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\vartheta} = \frac{8,81 \cdot 0,031}{15,32 \cdot 10^{-6}} \cong 17\,826 [1]$$

$$n = 60 \cdot f = 60 \cdot 35 = 2100 \text{ min}^{-1}$$

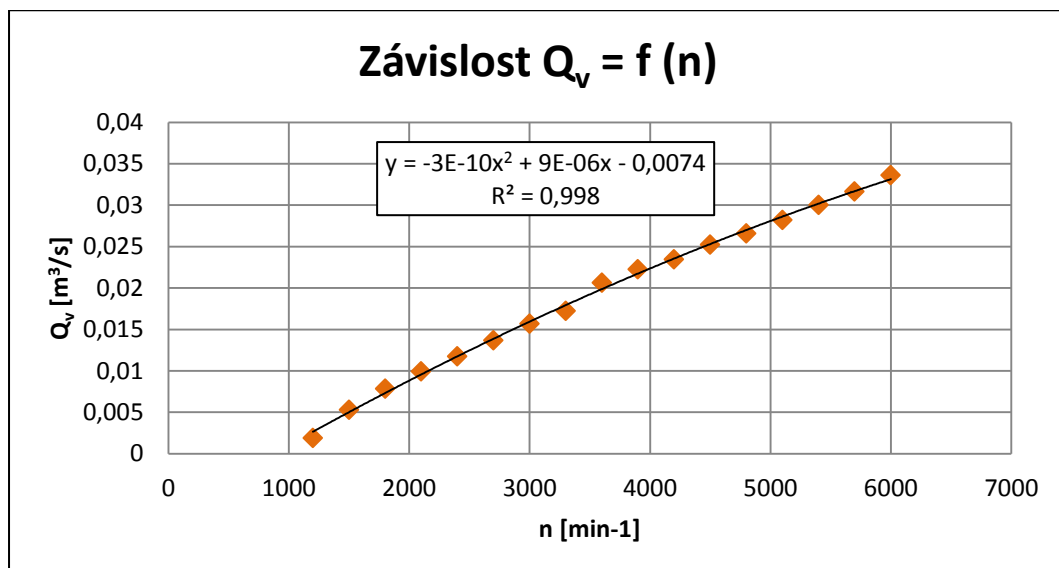
Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření průtoku pomocí kolenového průtokoměru jsou uvedeny v tab. 6.1. Reynoldsovo číslo Re [1] se pro všechna měření pohybuje v hodnotách, které odpovídají turbulentnímu proudění.

Tab. 6.1 – Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
Číslo měření	f	Δp	v_s	Q_v	Re	n
-	[Hz]	[Pa]	[m/s]	[m ³ /s]	[1]	[min ⁻¹]
1	20	1,7	1,69	0,0019	3423	1200
2	25	13,1	4,70	0,0053	9503	1500
3	30	28,7	6,95	0,0079	14065	1800
4	35	46,1	8,81	0,0100	17826	2100
5	40	64,5	10,42	0,0118	21086	2400
6	45	87,1	12,11	0,0137	24503	2700
7	50	114,9	13,91	0,0157	28143	3000
8	55	138,6	15,28	0,0173	30909	3300
9	60	198,2	18,27	0,0206	36963	3600
10	65	230,6	19,70	0,0223	39869	3900
11	70	256,3	20,77	0,0235	42032	4200
12	75	296,5	22,34	0,0252	45209	4500
13	80	329,6	23,56	0,0266	47665	4800
14	85	371,2	25,00	0,0282	50584	5100
15	90	420,4	26,60	0,0301	53832	5400
16	95	467,1	28,04	0,0317	56743	5700
17	100	526,2	29,76	0,0336	60226	6000

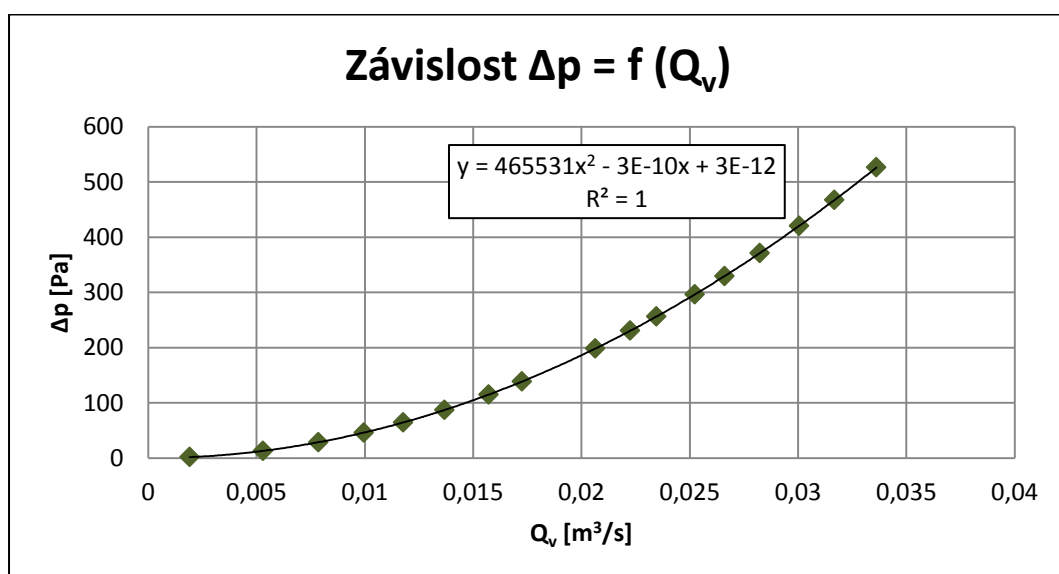
Grafy vyobrazující závislosti naměřených a vypočtených hodnot (tab. 6.1) jsou následující:

- Objemový průtok na otáčkách ventilátoru ($Q_v = f(n)$); viz obr. 6.4
- Tlaková ztráta kolenového průtokoměru na objemovém průtoku ($\Delta p = f(Q_v)$); viz obr. 6.5



Obr. 6.4 – Závislost objemového průtoku na otáčkách ventilátoru

Na obr. 6.4 je zobrazena závislost objemového průtoku na otáčkách ventilátoru. Je patrné, že s rostoucími otáčkami roste objemový průtok, který se pohybuje v rozmezí hodnot od $0,0019 \text{ m}^3/\text{s}$ do $0,0336 \text{ m}^3/\text{s}$ (polynomická závislost druhého řádu). Otáčky mají rozsah 300 min^{-1} až 6000 min^{-1} .



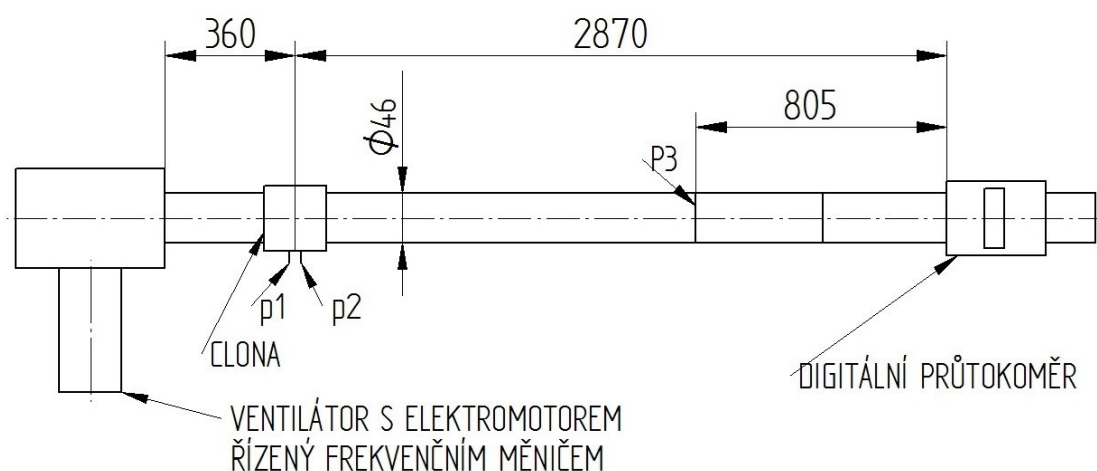
Obr. 6.5 – Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku

Obr. 6.5 zobrazuje závislost tlakové ztráty Δp měřené na kolenovém průtokoměru na objemovém průtoku Q_v . Objemový průtok se pohybuje v rozmezí hodnot od $0,0019 \text{ m}^3/\text{s}$ do $0,0336 \text{ m}^3/\text{s}$. Tlaková ztráta narůstá od $1,7 \text{ Pa}$ do $526,2 \text{ Pa}$. Je patrné, že s rostoucím průtokem roste i tlaková ztráta. Jedná se o polynomickou závislost druhého řádu.

7. Měření průtoku na vzduchové trati pomocí clony, cejchování clony

7.1 Popis měřícího zařízení

K třetí metodě měření průtoku na vzduchové trati byla využita clona (obr. 4.6), jejímž výrobcem je VŠB. Toto průřezové měřidlo bylo umístěno ve vzdálenosti 360 mm od ventilátoru s elektromotorem (obr. 4.1). Ventilátor s elektromotorem byl opět ovládán frekvenčním měničem (obr. 4.2). Ve vzdálenosti 2870 mm od clony je umístěn digitální průtokoměr SD 9000 (obr. 4.3), který měřil velikost průtoku vzduchu v potrubí o světlosti 46 mm pro následné cejchování clony. K měření difference tlaku na cloně byl použit diferenční převodník tlaku Almeno FD8612DPS (obr. 4.8) s analogovým výstupem, který byl připojen do vyhodnocovacího zařízení Almeno 2290-3 (obr. 4.7). Ve vzdálenosti 805 mm od digitálního průtokoměru byl umístěn odběrný kroužek k měření statického tlaku (obr. 4.9). Statický tlak při jednotlivých krocích měření je třeba znát pro přepočet průtoku z normálních podmínek na podmínky pracovní. Statický tlak (v obr. 7.1 p_3) byl rovněž vyhodnocován pomocí Almeno 2290-3. Na obr. 7.1 je zobrazeno schéma experimentální měřící tratě.



Obr. 7.1 – Schéma experimentální měřící tratě se clonou a digitálním průtokoměrem

Na obr. 7.2 je zobrazena reálná podoba experimentální měřící tratě. Na obr. 7.3 lze vidět detailní pohled na clonu, včetně jejího zapojení.



Obr. 7.2 – Reálná podoba experimentální měřicí tratě



Obr. 7.3 – Detailní pohled na clonu

7.2 Postup měření

Experimentální měřicí trať jsem sestavil, tak jak je uvedeno na schématu (obr. 7.1). Digitální průtokoměr byl umístěn na konci potrubí a byl připojen do zdroje napětí 10V. Kroužek pro odběr statického tlaku (obr. 4.9) byl opět osazen silikonovými hadičkami, které byly připojeny do digitálního převodníku (obr. 4.8). Silikonové hadičky jsem také umístil k odběrným místům clony (obr. 4.6), neboť zde se vyhodnocoval tlakový spád. Pro měření obou těchto tlaků současně jsem musel použít dva digitální převodníky, které byly současně připojeny do vyhodnocovacího zařízení Almeno 2290-3 (obr. 4.7). Při prvním měření byl frekvenční měnič nastaven na frekvenci 15 Hz. Při této frekvenci měl ventilátor otáčky 900 min^{-1} . Prvním krokem bylo odečtení tlakového spádu na cloně Δp_c z vyhodnocovacího zařízení. Po odečtení této hodnoty jsem odečetl hodnotu statického tlaku před průtokoměrem p_1 a následně jsem opsal hodnotu průtoku vzduchu z digitálního průtokoměru Q_{vN} . Tento postup byl dále proveden pro frekvenční rozsah v krocích 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100 Hz.

7.3 Vyhodnocení měření

Obecný postup výpočtu:

- a) Hodnotu tlakového spádu na cloně Δp_c [Pa] jsem odečítal z vyhodnocovacího zařízení a následně zapisoval do tabulky. Statický tlak p_1 , který byl měřen před digitálním průtokoměrem, jsem rovněž zaznamenával do tabulky. Posledním zapisovaným údajem do tabulky byla hodnota objemového průtoku Q_{vN} [Nm^3/h], která byla odečítána z digitálního průtokoměru.

- b) Přepočet objemového průtoku Q_{vN} [Nm^3/h] z normálních podmínek na podmínky pracovní:

$$Q_v = Q_{vN} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$p = p_N + p_1$$

- c) Velikost střední rychlosti proudění vzduchu na cloně v_s [m/s] dostaneme z rovnice kontinuity:

$$Q_v = v_s \cdot S \Rightarrow v_s = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2}$$

- d) Reynoldsovo číslo Re [1] získáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\vartheta}$$

- e) Otáčky elektromotoru n [min^{-1}] určíme ze vztahu:

$$n = 60 \cdot f$$

Ukázka výpočtu čtvrtého řádku z Tab. 7.1 pro metodu měření průtoku na vzduchové trati pomocí clony (trať obr. 7.1)

$$p = p_N + p_1 = 101325 + 138 = 101\,463 \text{ Pa}$$

$$Q_v = Q_{vN} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p} = 66,5 \cdot \frac{294,72}{273,15} \cdot \frac{101325}{101463} = 71,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_v = 71,7 \cdot \frac{1}{3600} = 0,0199 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_s = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,0199}{\pi \cdot 0,04^2} = 15,84 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\vartheta} = \frac{15,84 \cdot 0,04}{15,32 \cdot 10^{-6}} \cong 41\,355 [1]$$

$$n = 60 \cdot f = 60 \cdot 30 = 1800 \text{ min}^{-1}$$

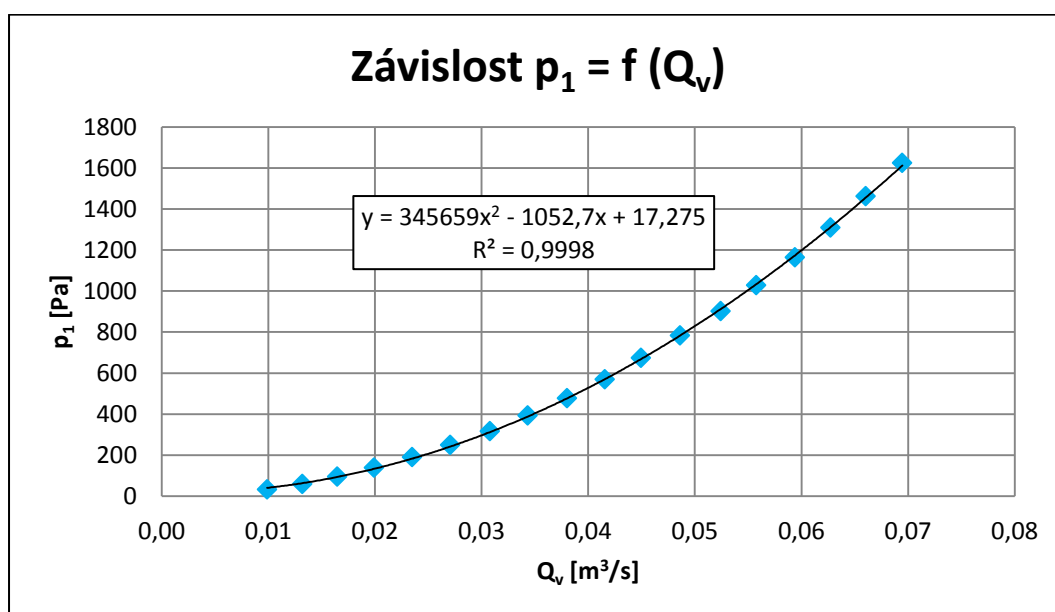
Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření průtoku pomocí clony jsou uvedeny v tab. 7.1. Reynoldsovo číslo Re [1] se pro všechna měření pohybuje v hodnotách, které odpovídají turbulentnímu proudění.

Tab. 7. 1 – Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Naměřené hodnoty					Vypočtené hodnoty					
	Q_{vN}	f	Δp_c	p_1	p	Q_v	Q_v	v_s	Re	n
Č. měření	[Nm ³ /h]	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[m ³ /s]	[m/s]	[1]	[min ⁻¹]
1	33	15	6,3	32,3	101357	35,6	0,0099	7,87	20543	900
2	44	20	28,7	59	101384	47,4	0,0132	10,49	27384	1200
3	55	25	56	94,7	101420	59,3	0,0165	13,11	34218	1500
4	66,5	30	88,1	138	101463	71,7	0,0199	15,84	41355	1800
5	78,5	35	127,5	189,1	101514	84,5	0,0235	18,69	48793	2100
6	90,5	40	169,7	248,5	101574	97,4	0,0271	21,53	56219	2400
7	103	45	220	315,6	101641	110,8	0,0308	24,49	63942	2700
8	115	50	275,7	393,1	101718	123,6	0,0343	27,32	71337	3000
9	127,5	55	339,1	476,9	101802	136,9	0,0380	30,27	79026	3300
10	139,5	60	404,2	568,5	101894	149,7	0,0416	33,09	86386	3600
11	151	65	480,1	673,1	101998	161,8	0,0450	35,78	93411	3900
12	163,5	70	560,6	782,2	102107	175,1	0,0486	38,70	101036	4200
13	176,5	75	648,4	900,7	102226	188,8	0,0524	41,73	108943	4500
14	188	80	740,3	1028,3	102353	200,8	0,0558	44,39	115896	4800
15	200,5	85	845,6	1163,6	102489	213,9	0,0594	47,28	123439	5100
16	212	90	950,6	1308,7	102634	225,8	0,0627	49,92	130335	5400
17	223,5	95	1063,7	1461,6	102787	237,7	0,0660	52,55	137200	5700
18	235,5	100	1184,2	1623,2	102948	250,1	0,0695	55,28	144340	6000

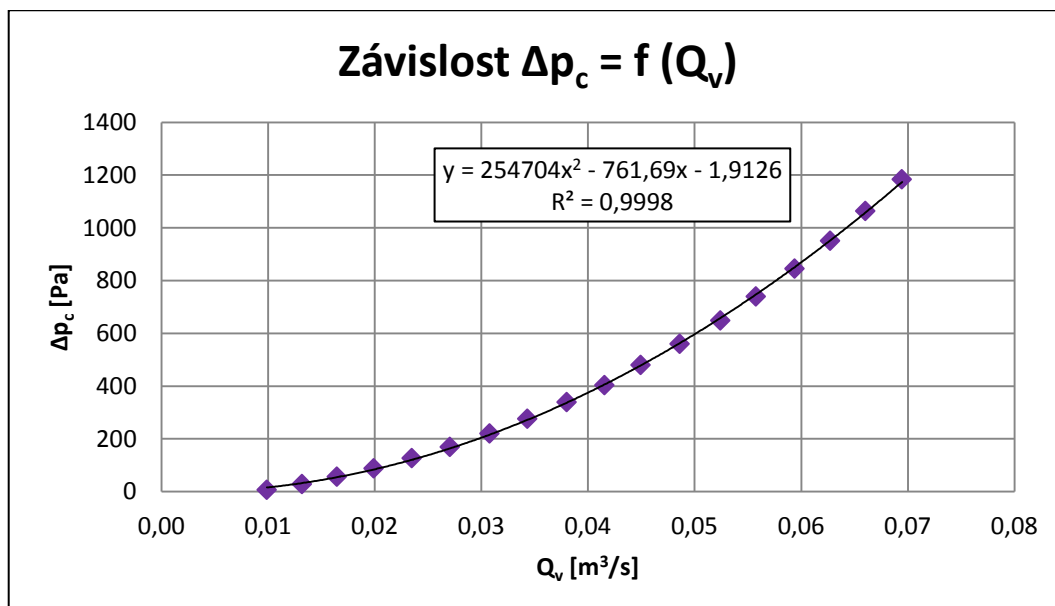
Grafy vyobrazující závislosti naměřených a vypočtených hodnot (tab. 7.1) jsou následující:

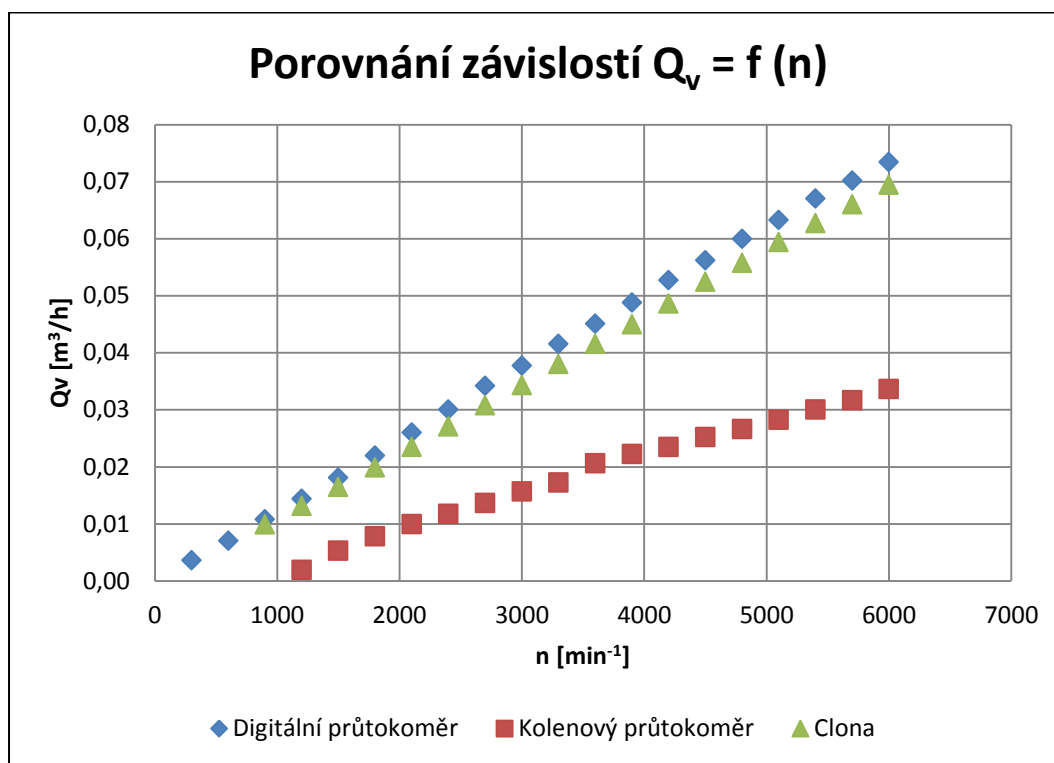
- Závislost statického tlaku na objemovém průtoku ($p_1 = f(Q_v)$); viz obr. 7.4
- Závislost tlakového spádu na cloně na objemovém průtoku ($\Delta p_c = f(Q_v)$); viz obr. 7.5
- Závislost objemového průtoku na otáčkách ventilátoru ($Q_v = f(n)$); viz obr. 7.6
- Porovnání závislostí objemového průtoku na otáčkách ventilátoru pro všechny použité metody měření ($Q_v = f(n)$); viz obr. 7.7



Obr. 7.4 – Závislost statického tlaku na objemovém průtoku

Obr. 7.4 zobrazuje závislost statického tlaku p_1 měřeného před digitálním průtokoměrem na objemovém průtoku Q_v . Se zvyšujícím se průtokem se zvyšuje i statický tlak, měřený před digitálním průtokoměrem (polynomická závislost druhého řádu). Objemový průtok se pohybuje v hodnotách od 0,0099 m³/h do 0,0695 m³/h. Statický tlak má rozsah 32,3 Pa až 1623,2 Pa.



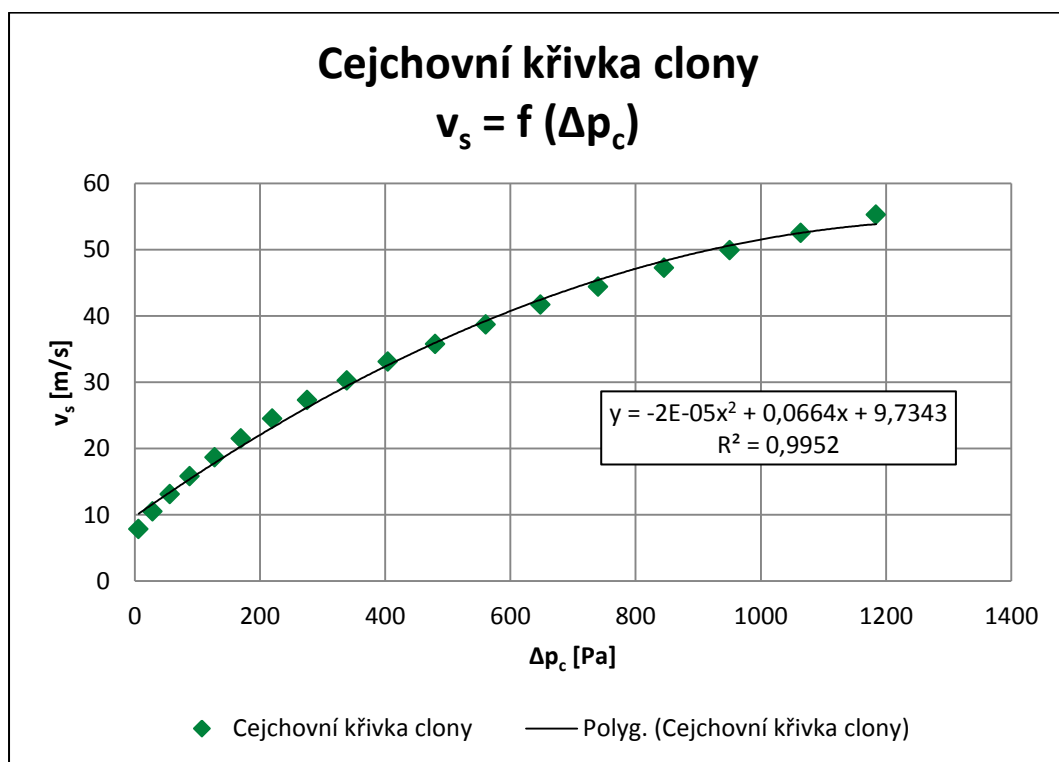


Obr. 7.7 – Porovnání závislostí objemového průtoku na otáčkách ventilátoru pro všechny použité metody měření

Obr. 7.7 zobrazuje porovnání závislostí průtoku vzduchu na otáčkách ventilátoru pro všechny použité metody měření. Pro všechny metody je typické, že se zvyšujícími se otáčkami roste i průtok. Zatímco závislost pro digitální průtokoměr a clonu se od sebe příliš neliší, pro kolenový průtokoměr je charakteristika odlišná. Jedním z faktorů této odlišnosti může být odpor a částečně profil měřicí tratě. Experimentální měřicí trať s digitálním průtokoměrem (obr. 5.1) nebo clonou (obr. 7.1) je tvořena rovným úsekem potrubí a tyto měřidla mají malý odpor vzduchu. Zatímco experimentální měřicí trať s kolenovým průtokoměrem, který má tvar kolene (obr. 6.1), způsobuje vyšší tlakový spád a tím i odpor měřicí tratě je výrazně větší což znamená, že při stejných otáčkách je průtok nižší. Je to způsobeno charakteristikou ventilátoru, který při stejných otáčkách není schopen dodat průtočné množství jako např. v případě měření pomocí digitálního průtokoměru.

7.4 Cejchování clony

Součástí této práce je i ocejchování použité clony. Cejchovní diagram clony vyjadřuje závislost střední rychlosti v_s na tlakovém spádu clony Δp_c ($v_s = f(\Delta p_c)$). Cejchovní křivka clony (obr. 7.8) slouží k určení průtoku vzduchu v potrubí pomocí měření tlakového spádu na cloně. Hodnoty průtoku vzduchu byly měřeny pomocí digitálního průtokoměru SD 9000 (obr. 4.3) na konci experimentální měřicí tratě (obr. 7.1). Z rovnice kontinuity jsem následně vypočetl střední rychlost v_s . Ukázka výpočtu je uvedena v kapitole 7.3.



Obr. 7.8 – Cejchovní křivka clony

Na obr. 7.8 lze vidět rovnici cejchovní křivku clony ($v_s = f(\Delta p_c)$) $v_s = -2 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_c^2 + 0,0664 \cdot \Delta p_c + 9,7343$ ($R^2 = 0,9952$). Z této rovnice lze vycházet pro výpočet střední rychlosti v_s , kde dosadíme hodnotu tlakového spádu clony Δp_c [Pa]. Objemový průtok je dán rovnicí kontinuity, kde dosadíme střední rychlost vypočtenou z rovnice cejchovní křivky.

8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout experimentální měřicí tratě, na kterých se měřil průtok vzduchu různými metodami. Celkově byly navrženy tři tratě, které jsem realizoval v učebně mechaniky tekutin E306.

V teoretické části práce jsem se ve druhé kapitole zabýval teorií měření plynů. Je zde vysvětlen nejen základní princip měření, ale také druhy proudění, které mohou nastat při proudění plynů potrubím. Je zde vysvětlena i Bernoulliho rovnice, jehož principu využívají průřezová měřidla průtoků. Ve třetí kapitole je uvedeno základní rozdělení metod měření průtoků. Rozlišujeme metody objemové, hmotnostní, rychlostní a konečně měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru. Ke každé zmíněné metodě jsou uvedeny základní typy měřidel, kde je stručně popsáno, na jakém principu fungují. U objemových metod měření průtoků plynu jsem vybral například bubnový plynoměr, membránový plynoměr a rotační plynoměr. Další popsané měřidla průtoků spadají do kategorie metod rychlostních. Jsou zde popsány měřidla průtoků, jako je průtokoměr turbínový a vírový. Coriolisův průtokoměr a tepelný hmotnostní průtokoměr využívají metody hmotnostní. Tepelný hmotnostní průtokoměr, konkrétně termoanemometr jsem využil při samotném měření v laboratoři. Poslední skupinou popsaných průtokoměrů je clona a kolenový průtokoměr, které spadají pod metodu měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru. Obě tyto měřidla byla rovněž využita při měření v laboratoři.

Praktická část této bakalářské práce se zabývá návrhem experimentálních měřících tratí průtoků vzduchu, kde je uveden popis použitých měřících zařízení. Celkově byly navrženy tři experimentální měřicí tratě. První trať využívala ke stanovení průtoků vzduchu digitální průtokoměr, který funguje na principu žárového anemometru. Druhá navržená trať využívala ke stanovení velikosti průtoků kolenový průtokoměr. Třetí navržená měřicí trať se nepatrně odlišuje od dvou předešlých. Je zde využita clona, která spadá pod kategorii průřezových měřidel. Clona však nevyhodnocuje velikost průtoků, tuto veličinu vyhodnocoval digitální průtokoměr, který byl použit i u první navržené tratě. Na cloně byl měřený pouze tlakový spád, na jehož základě byla clona oceňována. Všechny tyto navržené tratě využívali jako zdroj vzduchu ventilátor s elektromotorem, jehož otáčky byly měněny pomocí frekvenčního měniče.

Pro všechny tratě bylo rovněž použito stejné plastové potrubí a světlosti 46 mm. Ke snímání tlaku byly použity digitální převodníky tlaku s vyhodnocovacím zařízením Almeno.

Při měření průtoku vzduchu pomocí digitálního průtokoměru byl rozsah průtoku Q_v ($0,0036 \div 0,0734$) m^3/s . Podobných hodnot průtoku dosahovalo i měření s využitím clony, zde se průtok pohyboval v hodnotách Q_v ($0,0099 \div 0,0695$) m^3/s . Odlišných hodnot průtoku však dosáhnul kolenový průtokoměr, který měl rozsah průtoku Q_v ($0,0019 \div 0,0336$) m^3/s . Tato skutečnost je znázorněna na obr. 7.7, který porovnává závislosti průtoku vzduchu na otáčkách ventilátoru ($Q_v = f(n)$). Kolenový průtokoměr dosahuje nižšího průtoku oproti cloně a digitálnímu průtokoměru z důvodu vyššího odporu vzduchu a následnému odporu celé měřicí tratě což souvisí s charakteristikou ventilátoru. Ventilátor není schopen při stejných otáčkách dodat průtočné množství jako v případě clony a digitálního průtokoměru.

V závěru (kap. 7.4) jsem určil cejchovní křivku clony. Tato křivka vyjadřuje závislost střední rychlosti na tlakovém spádu clony ($v_s = f(\Delta p_c)$). Střední rychlost proudění vzduchu na cloně byla vypočtená z rovnice kontinuity. Hodnoty průtoku při jednotlivých otáčkách ventilátoru byly měřeny pomocí digitálního průtokoměru, který byl umístěn na konci experimentální měřicí tratě. Z cejchovní křivky clony byla vyjádřena rovnice, která bude využita při budoucích měření průtoku na cloně.

Cílem této bakalářské práce je informovat čtenáře a hlavně studenty oboru Hydraulická a pneumatická zařízení o možnostech využití měřidel průtoku na vzduchových tratích a je možné jí použít pro laboratorní měření z předmětu Mechanika tekutin.

9. Seznam použité literatury

- [1] MIKAN, J. *Měření plynů*. Říčany u Prahy, 2003, 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
- [2] <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k451>
- [3] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 447 s. ISBN 80-730-0156-X.
- [4] ORLÍKOVÁ, Soňa. Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy-prutokomeru>
- [5] KADLEC, Karel. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 1). [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100605.pdf>
- [6] KADLEC, Karel. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 2). [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au110624.pdf>
- [7] KADLEC, Karel. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 3). [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120630.pdf>
- [8] TECHMANIA - EDUTORIUM. Proudění tekutin. [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=281
- [9] <http://www.energoekonom.cz>
- [10] Měření třecích ztrát na vzduchové trati
<http://www.338.vsb.cz/PDF/SKRIPTA03.pdf>
- [11] www.ifm.com